

中国大型污染场地风险管控和修复管理建议

郝望望^{1,2}, 唐阔², 郭磊³, 蔡云², 迟子芳¹, 颜增光², 郭观林², 王玉^{2*}

1. 吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春 130021
2. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012
3. 山东大学海洋研究院, 山东 青岛 266237

摘要: 大型污染场地污染面积大、环境风险高、管控和修复难度大, 对人体健康和生态系统影响严重。我国大型污染场地主要分布于东部和中部地区, 特别是老工业基地涉及行业类型广泛, 因长年连片工业活动遗留了众多此类场地, 亟需采取针对性的土壤污染风险管控和修复措施, 而此项工作涉及经济、社会和技术各方面, 常规的管控和修复思路并不完全适用该类型场地。本文全面梳理了国内外大型污染场地界定标准、基于风险与适应性的管理策略及典型实践案例, 识别出我国存在大型污染场地界定标准不明确、风险管控和修复管理体系不完善、科技与资金保障不完备等问题。鉴于此, 提出我国大型污染场地风险管控与修复管理工作建议: ①明确大型污染场地的界定标准, 筛查并形成清单, 因地施策管控已有、预防新增; ②推动自然规划等部门与环境部门协作, 以“环境修复+开发利用”试点为依托, 构建大型污染场地内部风险分级管理模式, 完善调查、风险评估、管控和修复、长期监测的全方位、全周期技术标准体系; ③强化复合污染机理研究、建立修复决策支持系统、拓展多元化资金筹集, 通过推进科研突破、信息化升级与强化资金保障等措施, 支撑大型污染场地长期管理。

关键词: 大型污染场地; 老工业基地; 场地清单; 风险管控和修复

中图分类号: X323

文章编号: 1001-6929(2025)02-0356-10

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.11.08

The Recommendations of Risk Control and Remediation Management for Mega-Sites in China

HAO Wangwang^{1,2}, TANG Kuo², GUO Lei³, CAI Yun², CHI Zifang¹, YAN Zengguang², GUO Guanlin², WANG Yu^{2*}

1. College of New Energy and Environmental, Jilin University, Changchun 130021, China
2. Technical Center for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environmental, Ministry of Ecology and Environmental, Beijing 100012, China
3. Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, China

Abstract: Mega-sites have a large contaminated areas, present high environmental risks, and pose significant challenges in terms of control and restoration, leading to severe impacts to human health and ecosystems. In China, the spatial distribution of mega-sites is mainly concentrated in the eastern and central regions. Extensive mega-sites are located in old industrial bases as the result of prolonged and contiguous industrial activities. These sites span a wide range of industry types, requiring targeted risk control and soil contamination remediation measures. However, the risk control and remediation of mega-sites involve social, technical and economic considerations that are not fully addressed by conventional remediation strategies. This study provides a comprehensive review of the defining standards, management strategies, and remediation cases related to mega-sites both domestically and internationally. Based on this, we identify several gaps in scientific understanding of mega-sites in China, including the lack of clear definition criteria, inadequate risk control and remediation systems, and insufficient technological and financial support. Therefore, based on international experience in managing mega-sites and considering practical requirements of management, this paper proposes the following recommendations: (1) Clarifying the definition criteria of mega-sites, conducting a nationwide screening to form a comprehensive list, and implementing regional-specific

收稿日期: 2024-07-31 修订日期: 2024-11-12

作者简介: 郝望望(2000-), 男, 河北衡水人, 295989823@qq.com

* 责任作者: 王玉(1983-), 男, 山东泰安人, 正高级工程师, 博士, 主要从事建设用地土壤污染防治监管技术研究, wangyu@tcare-mee.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2023YFC3706404, 2020YFC1807501)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2023YFC3706404, 2020YFC1807501)

measures to control existing sites and prevent new ones from emerging. (2) Promoting collaboration between natural planning and environmental departments, developing a hierarchical risk management model based on the pilot program of 'environmental remediation + development and utilization' and improving the comprehensive and full cycle technical standard system for mega-sites. (3) Strengthening the research on the mechanisms of composite contamination, establishing a decision support system for remediation, and expanding diversified fundraising efforts. By leveraging scientific breakthroughs and advancing information technology, we hope to support the long-term management of mega-sites.

Keywords: mega-sites; old industrial bases; site list; risk control and remediation

随着土壤和地下水风险管控和绿色低碳修复等工作持续推进,我国正逐步形成系统完备、分类精细、多领域协同的场地管理体系。但一批污染面积大、环境风险高、管控和修复难度大的大型污染场地的风险管控和修复压力凸显。2023年12月,国务院印发《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》,突出强调要推动大型污染场地的风险管控和修复工作,逐步解决长期积累的土壤和地下水污染问题;生态环境部印发《关于促进土壤污染风险管控和绿色低碳修复的指导意见》(环办土壤〔2023〕19号),提出要科学选用风险评估方法和参数,合理确定大型复杂污染地块风险管控和修复目标。大型污染场地风险管控和修复是消除环境风险、保障人居环境安全,助推城市更新、提升土地价值,吸引投资、促进房地产和商业发展,打好净土保卫战、落实美丽中国建设的重要举措。

大型污染场地存在多种污染物混合以及可能的协同或拮抗作用且迁移途径广泛,因而影响受体众多、社会关注度更高、修复成本更大^[1-2],需要采取新的理念进行风险管控和修复管理^[3]。21世纪初,美国和欧洲的多个国家针对大型污染场地展开了一系列研究,包括大型污染场地的空间规划利用^[4]、决策系统开发^[5]、自然衰减研究^[6]、修复策略研究^[7]、污染表征手段研究^[8]、污染物迁移转化机理探究^[9]、风险评估方案研究^[10]等,而我国对大型污染场地的研究鲜有报道。本文对国内外大型污染场地管理经验进行介绍和分析,提出我国现阶段大型污染场地亟需解决的问题以及风险管控和修复管理工作建议。

1 国外大型污染场地概况、界定标准及管理策略

20世纪末,苏联解体对世界工业发展造成冲击,从而导致多个大型复杂遗留污染场地的产生,如原东德地区的Bitterfeld工业区被迫关停^[11],位于阿根廷的某美国军事基地关停并遗留36 km²的污染区等^[12]。进入21世纪,世界工业中心继续向东亚转移,发达国家的重工业体系陆续退出国际市场,大面积工业区的关停产生了系列大型污染场地,如美国Bethlehem钢

铁公司关停并遗留了7.28 km²的污染区,荷兰Rotterdam港口遗留约3万个污染源^[11]。这类场地污染面积大、时间长、污染物种类繁多、影响广泛,对修复时限与资金要求高(见表1)。

各国对大型污染场地的研究多开展于21世纪初,如意大利威尼斯研究联合会与威尼斯大学共同开发大型污染场地综合管理和修复决策系统DESYRE^[5],欧盟大型污染场地水资源、环境与景观管理项目^[11],以及北约现代挑战委员会大型污染场地试点研究^[12]等。国外研究提出了多种修复策略,如基于风险的综合管理策略^[11]、大型污染场地沉积物疏浚方案^[13]、监测污染物自然衰减方案^[14]、社会生态适应性管理方案^[15]。

1.1 欧盟

20世纪频繁的军事、工业和采矿活动导致欧洲土壤、地下水和地表水遭受严重的污染。据统计,欧洲存在约20 000个大型污染场地^[16],大面积的复合型污染对人类和水土系统构成了严重威胁。然而修复和重建大型污染场地的总费用预计超过1 000亿欧元^[16],由于成本过高,欧盟综合考虑土地价值、可持续性、修复和开发成本等因素,以制定兼具生态效益和成本效益的管理策略。2002年欧盟启动大型污染场地水资源、环境与景观管理项目,以期建立综合管理系统来帮助土地所有者、管理部门和技术专家管理大型污染场地的土地和水质^[11]。归纳项目中对大型污染场地的界定标准和管理策略如下。

a) 界定标准。大型污染场地通常难以彻底修复,规划和管理工作复杂,一般具有以下特点:①污染面积或影响区域大(平方公里规模);②土地所有者、利益相关方众多;③短期内修复污染成本过高,需基于风险进行区域综合管理。

b) 管理策略。主要包括三方面:①利益相关方全程参与管理。项目中积极组建利益相关方小组,在污染调查、界定风险管理区(对受体存在实际或潜在污染影响的区域)、划分风险集群(风险管理区的细分地理单元,由“污染源—污染物迁移途径—受体”序列构成)、选择修复方案和规划开发利用等环节听取各方意见,协作推动大型污染场地修复与管理。②分区

表 1 欧美国家典型大型污染场地概况
Table 1 Overview of typical mega-sites in Europe and America

场地名称	行业类型	污染原因	企业生产 开始时间	污染面积	超标污染物	影响范围	预计修复金额或 时长
荷兰Rotterdam港口	石油炼制、油气 仓储、化工生产	过时的生产设备、 生产工艺以及意 外泄漏	20世纪初	严重污染区 40 km ² ; 受影响 区域800 km ²	苯系物、氯乙烯、 氯乙烷、氯代苯、 氯甲烷类	人类、地表水、 地下水、港口围 场区	实现长期管理 最低1 510万欧 元/年
波兰Tarnowskie Góry 化工厂	化工生产	170万吨废弃物 和污泥倾倒以及 污染物沉积	1921年	垃圾填埋区 0.3 km ² ; 风险区 域3.89 km ²	硼、钡、砷、镉、 锶、锌	第四纪和三叠纪 I/II层地下含水 层、土壤、人类	1 200万欧元 (不包括地下水 修复)
德国Bitterfeld工业区	能源生产、化工 生产、褐煤开采	化工生产、设备 老旧、堆放废 弃物	20世纪初	严重污染区 25 km ² ; 受影响 区域50~100 km ²	多环芳烃、苯系 物、铅、镉、汞氯 代芳香烃	第三纪/第四纪地 下含水层、人类、 Mulde河	10亿欧元
德国Potsdam-Krampnitz 军事基地	—	废物倾倒、化学 储罐泄漏等	1937年	1.2 km ²	氯乙烯类、苯 系物	地下水、邻近 湿地	—
美国Hanford工厂	处理放射性核 废料	有机废物填埋、 放射性核素	1955年	地下污染羽 12.95 km ²	钨-99、碘-129、 硝酸盐、四氯化 碳、氟、铀、铬	土壤、地下水、 哥伦比亚河	25年内可以降低 含水层95%的污 染物浓度
阿根廷的某美国军事 基地	—	危险废物沉积、 燃料储罐泄漏	1941年	36 km ²	—	海洋	1.08亿美元

分级管理。基于“污染源—污染物迁移途径—受体”、结合水文地质条件和地下水流向构建大型污染场地风险集群,并根据受体种类、目标污染物毒性和迁移性等特征划分风险集群的风险等级,实现大型污染场地的分区分级管理(见图 1)。③创新修复融资模式。为推动污染土壤治理和大型污染工业区再开发,欧盟官方支持公司和城市政府形成合作经营模式,政

府出资用于项目规划、基础设施建设,企业出资土壤修复治理和再开发,引入第三方小额资本参与治理,鼓励金融机构加盟投资,极大地推动了工作的可持续性。
1.2 美国
美国大型污染场地涉及行业类型广泛,包括废物管理、采矿、化工生产等(见图 2),平均修复治理成本为 1.4 亿美元,约是普通污染地块的 11 倍^[17]。有

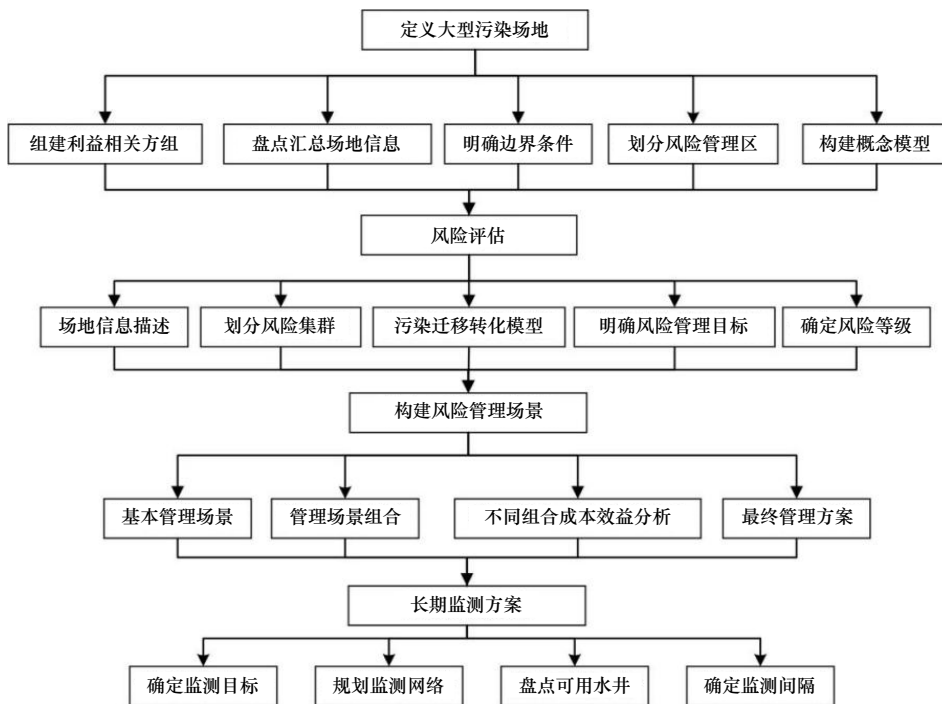


图 1 基于风险的综合管理策略^[13]

Fig.1 Intergrated management strategy based on risk^[13]

色金属采选矿区和流域尺度污染是美国大型污染场地关注的重点,如蒙大拿州的 Clark Fork 河流域金属开采和冶炼活动造成污染面积约为 600 km²,底泥污染的河段长度超过 300 km,污染最严重区域的砷、镉、铜、铅和锌污染需约 90 年才能自然衰减至风险可接受程度^[18];爱达荷州北部的 Coeur d'Alene 河流域矿山开采致使 6 200 万吨尾矿排放至河流之中,造成了 129 km²的内陆湖泊和 240 km 的河道被铅、锌、镉污染,流域地表水中的锌含量超过美国环境保护局(EPA)所规定环境水质标准的数千倍,Bunker 矿山附近儿童血铅水平超标严重,加剧了对人类健康与自然环境的风险^[19]。21 世纪初,美国明确了大型污染场地的界定标准并逐渐形成了较为完善的管理策略。

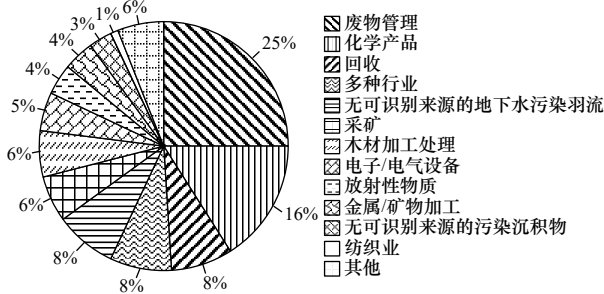


图 2 美国大型污染场地的各行业分布占比^[17]

Fig.2 The distribution proportion of various industries about mega-sites in United States^[17]

a) 界定标准。美国国家环境政策与技术咨询委员会向环境保护局提出影响大型污染场地治理复杂性和成本的因素^[17],包括影响面积大、管理技术复杂、废物管理风险高、地块类型特殊、多个污染源且分散独立、污染物传输介质复杂、未来存在风险、影响多个社区、责任方参与度低等。美国环境保护局以资金额界定,预计修复支出(不包括长期维护)不小于 5 000 万美元的超级基金污染地块界定为大型污染场地。

b) 管理策略。主要包括三个方面:①长期、分级、分区修复。为避免对公共健康的危害,大型污染场地被列入美国《国家优先治理污染地块名录》(National Priorities List, NPL) 优先治理,并实施能长期改善环境质量的修复方案^[17]。规划修复方案时,将按照地理位置、污染迁移途径、修复技术的类型划分为多个实施单元,分别开展工作。②适应性管理。污染源数量、空间异质性、被污染的沉积物等因素均会影响修复效果,美国国家研究委员会建议在大型污染场地采用适应性管理方法^[13],通过实时监测修复效果,持续调整修复目标和管理策略,以动态调整的方式应对大型污染场地管理过程中的不确定性(见图 3)。③强化

资金保障。美国国会基于《基础投资和就业法》授权对化学品制造等可能构成严重污染企业加征专门税,并以财政拨款方式支持超级基金,通过提供优惠政策和补贴、减免土地所有者和未来使用者责任等方式鼓励土地再开发,促进土地的可持续利用。

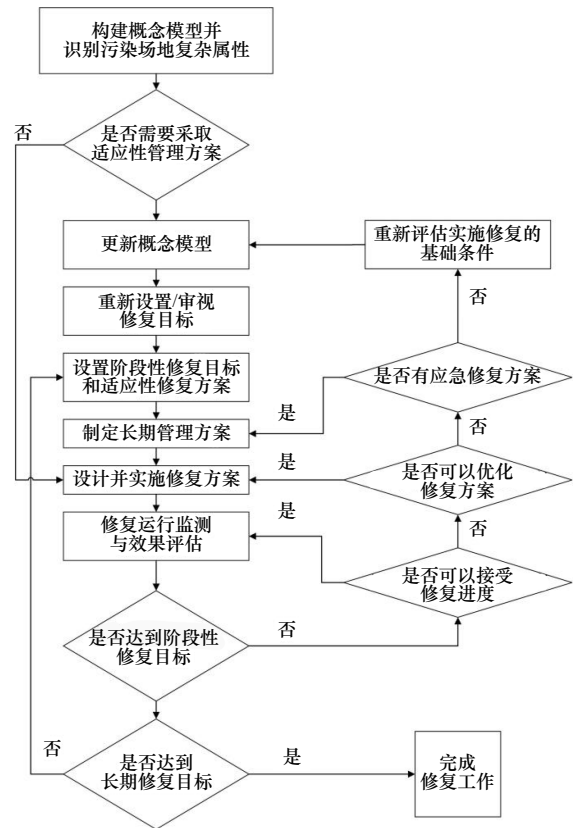


图 3 适应性管理策略^[20]

Fig.3 Adaptive management strategy^[20]

2 我国大型污染场地概况

20 世纪 90 年代以来,我国城市化进程加快,产业结构深化调整,许多位于城市中心区的工业企业陆续搬迁停产,遗留了大量的污染地块^[21-22]。目前我国土壤环境管理缺少大型污染场地明确界定,缺乏针对性的调查、评估及修复策略,在未来相当长一个时期我国大型污染场地的环境监管和整治任务仍然繁重^[23]。廖晓勇等^[1]提出了大型复杂污染场地的界定标准,即具有较大占地面积(0.5 km²以上)、多个污染源、多种污染物的工业污染场地,且具有场地规模大、具有独立污染源、环境风险大、治理难度大的特征。Song 等^[24]提出了一套环境、社会和经济可持续性评价体系,以期推动大型污染场地修复管理过程的可持续性。由于管理较为粗犷、缺乏公众监督参与,修复过程中二次污染比较严重^[2,25],应从调查评估与科学认知、方案决策与技术筛选、工程实施与监测评价等

方面着力破解大型污染场地修复治理难题^[1]。

我国大型污染场地主要由单一或连片工业活动形成,尤以东部和东北部地区的老工业基地为显著,涉及化工、金属冶炼等行业,呈现出空间分布上的集聚性和行业类型的广泛性,因历史遗留的环境污染问题,亟需综合施策进行治理与修复。

2.1 单一工业活动形成的大型污染场地

根据土壤污染状况调查有关资料,总结我国大型污染场地特点如下:①空间分布具有集聚性。单一工业活动形成的大型污染场地主要分布于我国东部和中部地区,比如辽宁、内蒙古、湖南等省份。我国东部和中部地区经济较为发达,矿产、石油等自然资源丰富,大型工业企业分布密集,因历史上生产工艺技术陈旧、管理水平相对较低、环保设施较落后等问题,经过多年的生产活动,易对土壤和地下水造成不同程度的污染。②行业类型分布广泛。主要行业类型为化学原料和化学制品制造业、黑色金属冶炼和压延加工业、有色金属矿采选业。化工生产和金属冶炼

属于高能耗行业,化学品制造和矿石提取金属一般会产生大量废水、废气、废渣,导致大规模的废弃物处理占地和生态环境危害。

2.2 连片工业活动形成的大型污染场地

依托“一五”“二五”“三线”建设时期国家重点工程项目形成的工业企业较为集中的城市中心老工业区,区内工业企业总面积在5 km²以上或区域内有大中型企业5家以上,集中了航空航天、国防军工、冶金、石化等重工业企业,产业层次低、排放强度大、发展方式粗放,区域内重金属污染、土地沉陷等问题严重^[26-28],属于因连片工业活动而形成的大型污染场地。

2013年,国务院推动老工业基地搬迁改造计划,规划范围的老工业基地国土面积约140×10⁴ km²,涉及95个地级老工业城市和25个直辖市、计划单列市、省会(首府)城市市辖区(见表2),主要分布于我国东部和中部地区,东北地区数量占比(24.2%)最大,西南、西北和华北地区占比(12.5%)最小(见图4)。

表2 我国老工业基地城市清单^[29]

Table 2 List of old industrial bases cities in China^[29]

省份	地级市、计划单列市与省会(首府)城市的市辖区
北京市	石景山区
天津市	原塘沽区
河北省	张家口市、唐山市、保定市、邢台市、邯郸市、承德市、石家庄市长安区
山西省	大同市、阳泉市、长治市、晋中市、临汾市、太原市万柏林区
内蒙古自治区	包头市、赤峰市
辽宁省	鞍山市、抚顺市、本溪市、锦州市、营口市、阜新市、辽阳市、铁岭市、朝阳市、盘锦市、葫芦岛市、沈阳市大东区、大连市瓦房店市
吉林省	吉林市、四平市、辽源市、通化市、白山市、白城市、长春市宽城区
黑龙江省	齐齐哈尔市、牡丹江市、佳木斯市、大庆市、鸡西市、伊春市、哈尔滨市香坊区
江苏省	徐州市、常州市、镇江市、南京市江北新区(原大厂区)
安徽省	淮北市、蚌埠市、淮南市、芜湖市、马鞍山市、安庆市、合肥市瑶海区
江西省	九江市、景德镇市、萍乡市、南昌市青云谱区
山东省	淄博市、枣庄市、济南市历城区
河南省	开封市、洛阳市、平顶山市、安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市、南阳市、郑州市中原区
湖北省	黄石市、襄阳市、荆州市、宜昌市、十堰市、荆门市、武汉市硚口区
湖南省	株洲市、湘潭市、衡阳市、岳阳市、邵阳市、娄底市、长沙市开福区
广东省	韶关市、茂名市
广西壮族自治区	柳州市、桂林市
重庆市	大渡口区
四川省	自贡市、攀枝花市、泸州市、德阳市、绵阳市、内江市、乐山市、宜宾市、成都市青白江区
贵州省	遵义市、安顺市、六盘水市、贵阳市小河区
云南省	昆明市五华区
陕西省	宝鸡市、咸阳市、铜川市、汉中市、西安市灞桥区
甘肃省	天水市、嘉峪关市、金昌市、白银市、兰州市七里河区
青海省	西宁市城中区
宁夏回族自治区	石嘴山市、银川市西夏区
新疆维吾尔自治区	克拉玛依市、乌鲁木齐市头屯河区

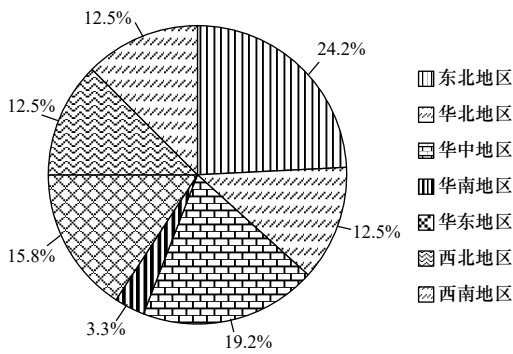


图 4 我国老工业基地各区域占比

Fig.4 Various regions proportional distribution of old industrial bases of China

基于交通便利、劳动力集中等因素考虑,老工业基地早期规划时多位于城区或靠近城区中心区域,形成了钢铁、煤炭、焦化、农药、机械制造及化工生产为主的典型行业类型,厂区附近土壤中特征污染物浓度高,如北京市焦化厂污染土壤中多环芳烃最高浓度达 10 647.2 mg/kg^[30]。老工业基地附近存在高密度的工业区住宅,严重的土壤污染状况对人体健康存在威胁。大型污染场地多为老旧工业企业搬迁遗留,截至 2020 年我国关停转迁的企业数量已经达到 22 488 家^[25,29]。而在老工业区搬迁改造过程中,污染评估不够全面、欠缺地下水修复治理、资金投入不足等问题突出,污染治理压力巨大,水土污染问题严重制约了老工业基地转型发展^[29]。

3 大型污染场地管理策略分析

工业集聚的特点赋予了大型污染场地较大的再开发利用潜力,然而由于技术、经济或社会层面的限制,搬迁和短期内彻底修复难度较大^[6],管理工作面临严峻挑战。适应性强的的大型污染场地管理策略对我国大型污染场地管理意义重大。

3.1 德国 Bitterfeld 工业区褐煤开采与化工生产大型污染场地

Bitterfeld 是 20 世纪工业化学品的主要国际生产贸易区,包括褐煤开采、能源生产、化工生产。生产经营活动超百年,产生约 4 500 种化合物,苯系物、氯代烃、氯苯等主要污染物造成约 25 km² 的土壤和地下水污染^[31]。该场地涉及利益方众多,20 世纪末德国政府集结专家,组建环保、规划、立法、监管、经济、居民、工业生产公司等成立利益相关方小组,共同参与污染状况调查、划分风险集群、修复技术筛选、规划开发利用等工作,良好的协调机制为推动管理工作顺利开展打下了基础。为合理制定修复目标和选取修复技术,修复专家通过筛选场地中污染源和受体之

间的主要污染途径构建简化的地块概念模型,并基于污染源、地下水流向、受体位置和源-汇关系将大型场地划分为 Wolfen、Bitterfeld-North、Bitterfeld、Greppin、North-East 五个风险集群(见图 5)。根据每个集群中受体重要性程度和污染物浓度、毒性、迁移性的加权结果,Wolfen 集群风险等级更高,其他四个集群具有相同风险等级。通过筛选每个集群中污染源、污染迁移途径、受体的可行管控措施,形成集群基本管理场景,具有相同风险等级的四个集群采用相同基本管理场景,最终组合基本管理场景形成制度控制和工程控制相结合的综合管理方案。

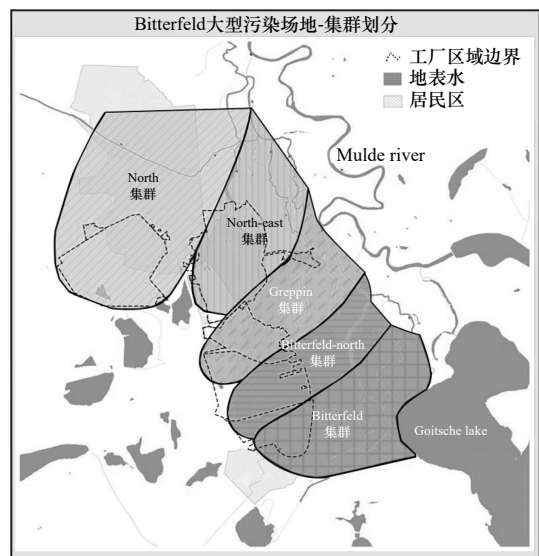


图 5 Bitterfeld 大型污染场地风险集群划分^[11]

Fig.5 Classification of risk cluster for the Bitterfeld mega-site^[11]

3.2 美国 Coeur d'Alene 河流域有色金属矿采选大型污染场地

该场地拥有 90 多座矿山和美国产量最高的铅矿和银矿,自 1880 年起,超 6 200 万吨废弃尾矿无任何阻隔措施侵入河流系统,导致区域湿地沉积物中的铅对人类和水生系统造成毒害。该场地自 1983 年列入美国《国家优先治理污染地块名录》,修复活动持续 20 多年,但河流中重金属浓度仍长期超风险,受污染的沉积物仍会伴随季节性洪泛扩散。梳理该场地的修复历程,总结三个关键点:①明确大型污染场地缺少经济高效的修复方法。该区域地理形势复杂,沉积物分布在高地、湿地和水生系统之中,由于污染规模、程度和复杂的地理条件,导致难以完全去除污染物,最初估算的 3.59 亿美元修复资金仅能实现初步修复目标。②采取长期管控。因缺少经济高效的修复方案,美国环境保护局将重点工作转移为长期风险管控

和监测,通过采取限制土地使用、维护已有修复工程、防止洪泛引起污染扩散等措施将环境风险控制在最低限度,并采取制度控制措施切断暴露途径。^③提出并实施适应性管理策略。随着对地区流域污染问题的深入研究,确定该场地在不同阶段的修复目标,达到阶段性修复目标后更新地块概念模型并建立新的监测方案,边学边做,及时跟进并采用最新技术。

3.3 我国首钢老工业区

首钢老工业区是我国主要的大型钢铁生产企业之一,厂区总面积约为9 km²,生产活动超百年,形成了钢铁制造、矿产资源开发、装备制造等多行业类型。截至2008年,工业区内高炉、冶炼厂、铸造厂、焦化厂陆续停产,长期生产活动致使土壤中铅、镉等重金属以及苯系物、多环芳烃等有机物浓度超标。首钢老工业区污染治理过程中,各部门高度协调联动,通过征收首钢权属用地土地收益,实施资金专项管理和定向使用,保障土壤污染治理修复,政府协调各部门简化首钢老工业区搬迁改造工作的行政审批程序,通过构建绿色审批通道以支持污染治理及周边环境整治。采取分块修复、分阶段效果评估理念,根据不同的土地利用用途,首钢老工业区被划分为多个地块(居住用地、公用设施、公园绿地等),基于特定土地利用方式下的环境敏感性分别确定了每个地块的暴露情景,分析污染特征构建地块概念模型,采取原位和异位修复技术相结合的修复方案降低地块对人体健康和生态环境的风险,最终满足各区块土地利用的环境质量标准要求。

3.4 管理策略分析

欧盟与美国在大型污染场地监管方面兼顾场地污染特点、风险管控与修复策略和资金保障等方面,在诸多案例实践中形成了较为完备的管理体系。通过精细构建大型污染场地概念模型和风险评估支撑监管策略。基于风险的管理策略根据场地调查情况识别污染物迁移的主要途径,简化地块概念模型进行有针对性的管理;适应性管理策略通过更新概念模型来调整修复方案,更加有效地应对管理过程中的不确定性。完备的知识体系、交互式的信息呈现是支撑大型污染场地管理的两个重点。欧盟项目通过开发决策支持系统将大规模、多源、多类的污染物分布可视化呈现,并量化污染物在迁移过程中的衰减、固化等作用,构建迁移转化模型,更精确地掌握污染物动态变化,更有利于优化适应性管理策略中的概念模型更新。长期监管是两种管理策略所共有的一项核心工作。大型污染场地在短期时间框架内实现完全修

复是不可能的^[5],预期投入、实际治理成本以及长期运营维护、监测等资金来源与法规支持的管理方式是实现长期管理的关键因素^[11]。虽然欧美等国早期建立了较为完备的大型污染场地管理体系,但仍存在资金不足的问题。由于大型污染场地形成时间跨度长,导致污染证据收集困难,复杂的污染责任认定也导致资金来源不明确,利益冲突方陷入长时间的法律诉讼,推迟修复进度,使污染问题持续恶化,造成更大的经济损失。

我国首钢老工业区修复案例及地方经验表明,我国尚且缺乏对大型污染场地的科学认知。主要表现在以下三方面:①缺少大型污染场地明确界定。调研分析表明,大型污染场地面积大、污染严重、风险高,应区别于普通污染地块定义,建立清单实施针对性的监管体系,及时补足环境监管漏洞,避免增加健康风险和破坏,同时予以资源倾斜。②风险管控和修复管理体系不完善。依照规划区块和产业开发需求划分大型污染场地不同区块进行修复会制约开发建设,大型污染场地具有土壤和地下水协同污染的特征,地下水是污染物迁移、扩散的载体,具有连通性,仅通过土地利用方式划分单个地块的土壤和地下水修复达到大型污染场地整体修复目标并不合理。③保障措施不足。目前在污染地块调查与修复过程中普遍存在重土壤而轻地下水污染的问题,并且修复技术也大多数仅针对单一介质(土壤或地下水)或单一污染物(某种重金属或有机污染物),缺乏水土协同修复技术和复合污染机理研究;大型污染场地的修复成本高昂,而责任方可能已经破产或解散,导致修复费用无人承担,难以实现场地的长期管理;另外,我国地块污染数据来源单一且以数值型结构化数据为主,现有土壤环境管理信息服务平台无法实现大型污染场地污染风险可视化,尚不能支撑修复方案的优化与模拟,与实时化、智能化的地块管理要求有较大差距^[32]。

4 对中国大型污染场地管理的借鉴

污染问题的思想变革推进污染场地治理政策不断发展,比如在荷兰,可持续性理念对“要求修复目标满足未来任何土地使用用途”的“一刀切”修复理念产生了深刻影响^[33-34]。大型污染场地区域内涉及多种用地类型,采用单一居住用地假设而进行的风险评估过于保守,导致过度修复^[35]。我国已广泛接受基于风险评估的污染地块管理方法,相关技术手段也已普遍使用^[22]。然而大型污染场地仍只有零星研究,尚未建立大型污染场地重点关注清单和调查评估与修复体系,缺乏复合污染机理研究和大型污染场地综合

管理决策系统建设。欧美等国家在长期实践中积累了丰富的经验,但我国大型污染场地的风险管控和修复管理工作仍有待探索。鉴于大型污染场地对人体健康和生态环境影响日益受关注,影响土地开发利用,提出如下建议。

4.1 明确界定标准并形成清单

通过对国外大型污染场地内涵外延分析,综合考虑我国土壤污染状况,大型污染场地多为长期单一或连片工业活动形成的污染或影响面积大、环境风险高、管控和修复难度大的地块,这些地块一般具有以下特征:①长期。污染时间长,地块存在时间在20年以上。②单一或连片。单个地块或者工业集聚区、矿山开采、选矿、冶炼活动区、填埋场等,涉及化工生产、港口运输、钢铁制造、石油化工以及重有色金属、硫铁矿、石煤开采等。③污染或影响面积大。污染面积和影响区域在1 km²以上,涉及多个利益相关方,具有较大转化和利用价值。④环境风险高。污染物种类多(源),主要污染物种类多,具有复合性;迁移途径复杂(途径),通过空气传播、直接接触、生物富集、饮水等多种介质间迁移对受体产生风险;受体广泛(受体),包括人类、地表水、地下水、沉积物。⑤管控和修复难度大。修复治理所需投资巨大、周期长、社会影响大、技术经济性差、涉及多个利益相关方,宜整体考虑设计修复策略。

开展全国范围内的筛查,建立不同行业大型污染场地清单。逐步查清腾退区域内部和周边土壤污染状况,采取措施管控污染,确保污染不扩散、风险可接受;开展大型污染场地成因分析,严格保护未污染土壤,推动污染防治关口前移,健全土壤污染源预防体系;聚焦重点区域和行业类型,研究土壤污染风险管控和修复计划,因地制宜采取措施,开展专项活动,形成典型案例,梳理总结最佳管理措施的经验。

4.2 完善大型污染场地风险管控和修复管理体系

为解决传统地块风险管控和修复管理体系在大型污染场地方面适用性差的问题,提出以下三点建议:①以大型污染场地为载体,联合自然规划、住房和城乡建设等部门协同开展城市产业开发需求和规划区块与修复和开发利用工作,推进“环境修复+开发利用”模式试点,通过合理规划与开发利用,提升区域经济价值和社会功能,推动土壤和地下水污染防治与土地开发利用高效衔接,实现生态效益、经济效益和社会效益的共赢。②基于“污染源—污染物迁移途径—受体”关系结合开发需求对整个大型污染场地内部区块进行风险等级划分,构建大型污染场地内部

风险分级管理模式,根据污染物迁移转化规律及有效暴露剂量,合理确定不同内部区块的风险管控和修复目标,高风险区重点优先管控、中风险区一般管控、低风险区长期监测安全利用,推进大型污染场地科学合理风险管控和修复。③完善调查、评估、风险管控和修复、监测和后期管理等全周期、全方位的技术标准体系。综合遥感、钻孔采样、机器学习、历史生产活动等调查手段,精细刻画水文地质条件和污染物在大面积、强异质性地下空间分布;基于水文地质条件,结合地理信息系统和三维建模等技术联合解译污染物的环境行为(土壤-地下水界面的自然衰减、氧化还原反应、微生物降解、重金属固化作用等),预测污染物在多种环境介质(土壤、地下水、微生物等)中的迁移转化趋势,进行全面的风险评估;贯彻绿色可持续修复理念,倡导全过程协调和利益相关方的全面参与,基于整体考虑风险管控措施,实现水土协同修复,从全生命周期角度评估大型污染场地水土协同大规模修复和风险管控的二次影响,推动绿色可持续修复。

4.3 健全保障措施

为有效应对大型污染场地风险管控和修复复杂挑战,需采取综合性策略,聚焦科研突破、信息化升级与资金保障,以创新驱动大型污染场地的可持续修复与管理。主要措施如下:①深化对复合污染物的协同或拮抗作用研究。探究在异质性条件下,土壤和地下水的理化性质如何影响污染物之间的相互作用,揭示复合污染物最优修复策略的科学依据。构建和完善污染物迁移转化模型,考虑到空间异质性和极端环境条件,发展更加精确的模型以准确预测污染物的迁移途径和转化规律,为治理策略的制定提供支撑。②强化信息化支撑。基于全国建设用地土壤环境管理信息系统,研发大型污染场地修复决策支持模块,集成风险评估、技术评估、成本效益分析等功能,利用大数据和人工智能技术,实现污染风险可视化、修复方案的优化与模拟,以及经济成本与公众接受度的综合考量,为决策者提供科学依据。提升数据可视化与交互性,增强决策的透明度和公众参与度。③强化资金保障与政策支持。多元化资金筹集机制,拓展土壤污染防治专项资金支持范围,撬动政府、企业、社会团体和私人资本的多元投资,提供税收优惠和财政补贴,保障修复项目的持续性和稳定性。

5 结束语

大型污染场地是长期积累的土壤和地下水严重污染问题之一,事关环境安全和土地开发利用。欧美

等国家从污染特点方面理清了界定标准,在修复实践中形成了分区分级和长期管控的全方位管理策略。我国大型污染场地分布范围大、涉及行业类型广,对其进行风险管控和修复在美丽中国建设过程中发挥着关键作用。我国应明确界定标准,建立大型污染场地清单,推动土壤污染源头防治,并以强化复合污染机理研究、建设决策系统、落实资金保障为根本,以“环境修复+开发利用”模式试点为着力点,推进完善规划开发利用、污染调查、风险评估、风险管控和修复、长期监测的全方位、全周期标准技术体系,为深入打好净土保卫战奠定科学支撑和实践基础。

参考文献 (References):

- [1] 廖晓勇,侯艺璇,李允,等.我国大型复杂污染场地治理修复的挑战与对策 [J].中国科学院院刊,2023,38(12):1874-1882.
LIAO X Y,HOU Y X,LI Y,et al.Challenges and countermeasures for treatment and remediation of contaminated mega-sites in China [J].Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2023,38(12):1874-1882.
- [2] 侯德义.我国工业场地地下水污染防治十大科技难题 [J].环境科学研究,2022,35(9):2015-2025.
HOU D Y.Ten grand challenges for groundwater pollution prevention and remediation at contaminated sites in China[J].Research of Environmental Sciences,2022,35(9):2015-2025.
- [3] WEISS H,DAUS B,HEIDRICH S,et al.Management options for regionally contaminated aquifers:a case study at Bitterfeld, Germany[J].Soil and Water Pollution Monitoring,Protection and Remediation,2007:579-589.
- [4] SCHÄDLER S,MORIO M,BARTKE S,et al.Integrated planning and spatial evaluation of megasite remediation and reuse options [J].Journal of Contaminant Hydrology,2012,127(1/2/3/4):88-100.
- [5] CARLON C,CRITTO A,RAMIERI E,et al.DESYRE:decision support system for the rehabilitation of contaminated megasites[J].Integrated Environmental Assessment and Management,2007,3(2):211-222.
- [6] MÜLLER C,KNÖLLER K,LUCAS R,et al.Benzene degradation in contaminated aquifers:enhancing natural attenuation by injecting nitrate[J].Journal of Contaminant Hydrology,2021,238:103759.
- [7] LÉVY L,BORDING T S,FIANDACA G,et al.Managing the remediation strategy of contaminated megasites using field-scale calibration of geo-electrical imaging with chemical monitoring[J].Science of the Total Environment,2024,920:171013.
- [8] REIN A,POPP S,ZACHARIAS S,et al.Comparison of approaches for the characterization of contamination at rural megasites[J].Environmental Earth Sciences,2011,63(6):1239-1249.
- [9] TIDWELL L G,BLAIR-PAULIK L,ANDERSON K A.Air-water exchange of PAHs and OPAHs at a superfund mega-site[J].Science of the Total Environment,2017,603:676-686.
- [10] ANDRISANI M G.Relative risk assessment in support of the management of potentially contaminated megasites[J].Rendiconti Lincei Scienze Fisiche e Naturali,2019,30(2):389-398.
- [11] Welcome Consortium.Intergrated management strategy-Welcome [EB/OL].Delft,the Netherlands:Deltares,(2013-04-29)[2024-07-05].<https://publicwiki.deltares.nl/collector/pages.action?key=IMSW>.
- [12] North Atlantic Treaty Organization Committee on the Challenges of Modern Society.NATO/CCMS pilot study:prevention and remediation issues in selected industrial sectors:mega-sites [EB/OL].Washington DC:U.S. Environmental Protection Agency,(2005-07-12)[2024-07-05].<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P10001EV.txt>.
- [13] U.S.National Research Council.Sediment dredging at Superfund megasites:assessing the effectiveness [M].Washington DC: National Academies Press,2007:23-54
- [14] SCHIRMER M,DAHMKKE A,DIETRICH P,et al.Natural attenuation research at the contaminated megasite Zeitz[J].Journal of Hydrology,2006,328(3/4):393-407.
- [15] SCHIRMER M,LYON K,ARMSTRONG J E,et al.A socio-ecological adaptive approach to contaminated mega-site management:from ‘control and correct’ to ‘coping with change’ [J].Journal of Contaminant Hydrology,2012,127(1/2/3/4):101-109.
- [16] U.S. Environmental Protection Agency,the German Federal Ministry for Education and Research.Regional approaches and tools for sustainable revitalization:Documentation of a Workshop of the U.S.-German Bilateral Working Group [EB/OL].Berlin: Forschungszentrum Jülich GmbH,(2009-03-26)[2024-07-05].https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=204723.
- [17] U.S. Environmental Protection Agency.Superfund Subcommittee of the National Advisory Council for Environmental Policy and Technology [EB/OL].Washington DC:U.S.Environmental Protection Agency,(2004-04-12)[2024-07-05].<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100C5PV.txt>.
- [18] MOORE J N,LANGNER H W.Can a river heal itself?natural attenuation of metal contamination in river sediment[J].Environmental Science & Technology,2012,46(5):2616-2623.
- [19] GUSTAVSON K E,BARNTHOUSE L W,BRIERLEY C L,et al. Superfund and mining megasites[J].Environmental Science & Technology,2007,41(8):2667-2672.
- [20] U.S. Interstate Technology & Regulatory Council.Remediation management of complex sites [EB/OL].Washington DC:Interstate Technology & Regulatory Council,(2017-10)[2024-07-05].<https://rmcs-1.itrcweb.org/about-itrc/>.
- [21] 姜林,梁竞,钟茂生,等.复杂污染场地的风险管理挑战及应对 [J].环境科学研究,2021,34(2):458-467.
JIANG L,LIANG J,ZHONG M S,et al.Challenges and response to risk management of complex contaminated sites[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(2):458-467.
- [22] 周友亚,姜林,张超艳,等.我国污染场地风险评估发展历程概述 [J].环境保护,2019,47(8):34-38.

- ZHOU Y Y,JIANG L,ZHANG C Y,et al.Development of risk assessment of contaminated sites in China[J].*Environmental Protection*,2019,47(8):34-38.
- [23] 李发生.我国大型污染场地的治理任务与若干问题探 [EB/OL].北京:豆丁网,(2013-10-22)[2024-07-05].<https://www.docin.com/p-1033205171.html>.
- [24] SONG Y N,HOU D Y,ZHANG J L,et al.Environmental and socio-economic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies:a case study at a mega-site in China[J].*Science of the Total Environment*,2018,610/611:391-401.
- [25] 孙兴凯,黄海,王海东,等.大型污染场地修复过程中的问题探讨与工程实践 [J].*环境工程技术学报*,2020,10(5):883-890.
- SUN X K,HUANG H,WANG H D,et al.Discussion of problems in the process of large-scale contaminate sites remediation and project practice[J].*Journal of Environmental Engineering Technology*,2020,10(5):883-890.
- [26] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.东北城区老工业区搬迁改造专项实施办法 [EB/OL].北京:国家发展和改革委员会,(2015-03-17)[2024-07-05].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201503/t20150325_963784.html.
- [27] 中华人民共和国政府.关于推进城区老工业区搬迁改造的指导意见 [EB/OL].北京:中央人民政府,(2013-03-11)[2024-07-05].https://www.gov.cn/gongbao/content/2014/content_2640853.htm.
- [28] 王恒,胡哲伟,单艳红,等.合肥老工业基地污染地块治理修复实践与思考 [J].*中国水土保持*,2024(3):22-26.
- WANG H,HU Z W,SHAN Y H,et al.Practice and reflection on the treatment and restoration of polluted land in old industrial base of Hefei[J].*Soil and Water Conservation in China*,2024(3):22-26.
- [29] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.全国老工业基地调整改造规划(2013—2022年)[EB/OL].北京:国家发展和改革委员会,(2013-03-18)[2024-07-05].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201304/t20130402_962134.html.
- [30] 钟名誉,李慧颖,贾晓洋,等.不同焦化厂土壤中多环芳烃污染特征比较研究 [J].*生态与农村环境学报*,2021,37(5):627-635.
- ZHONG M Y,LI H Y,JIA X Y,et al.A comparative study on the pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soil of different coking plants[J].*Journal of Ecology and Rural Environment*,2021,37(5):627-635.
- [31] NIJENHUIS I,STOLLBERG R,LECHNER U.Anaerobic microbial dehalogenation and its key players in the contaminated Bitterfeld-Wolfen megasite[J].*FEMS Microbiology Ecology*,2018. doi:10.1093/femsec/fiy012.
- [32] 晏井春,宋静,孙钰沅,等.我国工业场地土壤污染防治十大科技问题与对策 [J].*环境科学研究*,2024. doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2024.09.24.
- JING Y C,SONG J,SUN Y Y,et al.The scientific & technological challenges and strategies for soil pollution prevention and remediation of contaminated industrial sites in China[J].*Research of Environmental Sciences*,2024. doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2024.09.24.
- [33] 赵丹,於方,廖晓勇,等.发达国家(地区)污染场地修复现状及对中国的启示 [J].*中国科学院大学学报*,2023,40(4):441-452.
- ZHAO D,YU F,LIAO X Y,et al.Status of remediation for contaminated sites in developed countries and regions and its enlightenment to China[J].*Journal of University of Chinese Academy of Sciences*,2023,40(4):441-452.
- [34] 薛英岚,张鸿宇,郝春旭,等.污染场地风险管控环境经济政策体系:国外经验与本土实践 [J].*中国环境管理*,2021,13(5):135-142.
- XUE Y L,ZHANG H Y,HAO C X,et al.Environmental economic policy system for risk management of contaminated sites:foreign experience and local practice[J].*Chinese Journal of Environmental Management*,2021,13(5):135-142.
- [35] 张丽娜,姜林,钟茂生,等.基于用地规划的大型污染场地健康风险评估 [J].*环境科学研究*,2015,28(5):788-795.
- ZHANG L N,JIANG L,ZHONG M S,et al.Risk assessment based on planning scenarios for a large-scale contaminated site[J].*Research of Environmental Sciences*,2015,28(5):788-795.

(责任编辑:周巧富)